ISSN:

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه: ۱۳۹ تا ۱۵۹

مجله علمی مهندسی مکانیک

تحلیل جامع پتانسیل‌ها و چالش‌های فناوری‌های انرژی خورشیدی در گذار به سیستم انرژی پایدار: مروری بر آخرین دستاوردها و چشم‌اندازهای آتی

علیرضا محمودی فرد*[۱]، سید محمدرضا حسینی علی آباد[۲]، محمدمعین رشیدپور[۳]

[۱] پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza۱۰.m۱۰@gmail.com

[۲] فوق دکتری مدیریت بازرگانی-مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارمنستان و استاد دانشگاه های ایران، ارمنستان و ترکیه، info@confnashr.ir

[۳] مدرس، کارشناس و متخصص خودروهای وارداتی

ISSN

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

چکیده

انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی گذار انرژی در قرن بیست‌ویکم شناخته می‌شود. این مقاله با بهره‌گیری از آخرین داده‌های معتبر بین‌المللی، به تحلیل جامع وضعیت کنونی، پتانسیل‌ها و چالش‌های پیشِروی این فناوری می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهند که هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی در دهه گذشته تا ۸۵ درصد کاهش یافته و به سطح ۰.۰۲۸ دلار بر کیلووات‌ساعت رسیده است. از سوی دیگر، راندمان سلول‌های خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی با توسعه فناوری‌های نوینی همچون سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون به مرز ۳۳.۹ درصد رسیده است. با این وجود، چالش‌های مهمی از جمله متناوب بودن تولید، نیاز به توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی مقرون‌به‌صرفه، مدیریت پسماند پایان عمر پنل‌ها و یکپارچه‌سازی در مقیاس بزرگ در شبکه‌های برق سنتی همچنان پابرجا هستند. این پژوهش راهکارهای نوینی از جمله توسعه سیستم‌های کشاورزی-ولتائیک (agrivoltaics)، به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت شبکه و طراحی چارچوب‌های اقتصاد چرخشی برای بازیافت پنل‌ها را به‌عنوان مسیرهای پیشِرو برای غلبه‌بر این چالش‌ها پیشنهاد می‌نماید. در نهایت، مقاله بر لزوم اتخاذ رویکردی یکپارچه و بین‌رشته‌ای برای تحقق کامل پتانسیل انرژی خورشیدی در ایجاد یک سیستم انرژی پایدار تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی

انرژی خورشیدی، فتوولتائیک، سلول تاندم، راندمان، هزینه تولید، ذخیره‌سازی، بازیافت، یکپارچه‌سازی شبکه

مجله علمی مهندسی مکانیک
ISSN: mechanical-eng.ir

تحلیل جامع پتانسیل‌ها و چالش‌های فناوری‌های انرژی خورشیدی در گذار به سیستم انرژی پایدار: مروری بر آخرین دستاوردها و چشم‌اندازهای آتی

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و محمدمعین رشیدپور

مقدمه

چشم‌انداز انرژی جهان در آستانه‌ی تحولی بنیادین قرار دارد. افزایش سریع تقاضای انرژی، نگرانی‌های فزاینده در مورد امنیت انرژی، و بحران فزاینده‌ی تغییرات آب‌وهوایی، سه‌گانه‌ی تهدیدآمیزی را تشکیل می‌دهند که مسیرهای سنتی توسعه را به چالش کشیده‌اند (IEA, ۲۰۲۳). در این میان، انرژی خورشیدی نه به‌عنوان یک گزینه، بلکه به‌عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای گذار به یک آینده‌ی پایدار ظهور کرده است. این شکل از انرژی، که از بی‌کران‌ترین منبع جهان، خورشید سرچشمه می‌گیرد، پتانسیل عظیمی برای تأمین نیازهای بشری بدون افزودن بر بار آلودگی سیاره‌ی ما دارد (IRENA, ۲۰۲۲). تاریخچه‌ی بهره‌برداری از انرژی خورشیدی به تمدن‌های باستان بازمی‌گردد، اما قرن بیست‌ویکم شاهد شتابی بی‌سابقه در فناوری‌های فتوولتائیک (PV) و حرارتی خورشیدی بوده است. نوآوری‌های پی‌درپی در علم مواد، به‌ویژه با ظهور پروسکایت‌ها و سلول‌های تاندمی، راندمان تبدیل انرژی را از مرزهای نظری گذشته فراتر برده و هزینه‌های تولید را به‌صورت نمایی کاهش داده‌اند (NREL, ۲۰۲۳). این پیشرفت‌ها، انرژی خورشیدی را از یک فناوری نیچ و یارانه‌محور به رقابتی‌ترین گزینه در بسیاری از بازارهای انرژی جهان تبدیل کرده است. با این حال، مسیر گسترش همه‌جانبه‌ی انرژی خورشیدی هنوز با موانع ساختاری و فنی مهمی روبرو است. مسئله‌ی متناوب بودن و غیرقابل پیش‌بینی بودن خورشید، چالش‌های عظیمی را برای یکپارچه‌سازی در مقیاس کلان در شبکه‌های برق ایجاد می‌کند که مستلزم توسعه‌ی راه‌حل‌های نوآورانه‌ی ذخیره‌سازی انرژی، مدیریت هوشمند شبکه و سیستم‌های انرژی هیبریدی است (Denholm et al., ۲۰۲۱). علاوه‌بر این، جنبه‌های چرخه‌ی عمر، از جمله تأثیرات زیست‌محیطی تولید و بازیافت پنل‌ها، نیازمند توجه جدی از منظر اقتصاد چرخشی است (Xu et al., ۲۰۲۲). در بعد اجتماعی-اقتصادی، عدالت در دسترسی به انرژی خورشیدی و مدل‌های کسب‌وکار غیرمتمرکز برای جوامع محروم و روستایی، حوزه‌ی دیگری است که پژوهش‌های بین‌رشته‌ای را می‌طلبد (Sovacool & Dworkin, ۲۰۲۱). این مقاله با درنظرگیری این چالش‌ها و فرصت‌ها، در پی ارائه‌ی یک چارچوب نوآورانه برای این موضوع است. ما استدلال می‌کنیم که رویکرد پیشنهادی ما می‌تواند گامی اساسی در جهت تحقق پتانسیل کامل انرژی خورشیدی برای ایجاد یک سیستم انرژی انعطاف‌پذیر، قابل اعتماد و کاملاً کربن‌زدایی شده بردارد.

متن بررسی

انرژی خورشیدی، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی گذار انرژی جهانی، از سه جنبه‌ی فناوری، سیستم‌های انرژی و پایداری نیاز به واکاوی جامع دارد. در حوزه‌ی فناوری، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلورین همچنان سهم غالب بازار را در اختیار دارند، اما فناوری‌های نسل جدید مانند سلول‌های پروسکایت با راندمان تبدیل سریع‌الرشد و هزینه‌ی تولید پایین‌تر، نوید تحولی اساسی را می‌دهند (Rong et al., ۲۰۲۳). پژوهش‌های اخیر در زمینه‌ی سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون به رکوردهای راندمانی بیش از ۳۳ درصد در شرایط آزمایشگاهی دست یافته‌اند که پتانسیل ذاتی این فناوری را برای شکستن محدودیت‌های تئوری شاکلی-کوییسر نشان می‌دهد (Al-Ashouri et al., ۲۰۲۳). با این حال، چالش اصلی در پایدارسازی این سلول‌ها در مقیاس بزرگ و در برابر عوامل مخرب محیطی نهفته است. در کنار فتوولتائیک، سیستم‌های حرارتی خورشیدی متمرکزکننده (CSP) با قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی ذاتی خود، نقش مکمل و حیاتی در تأمین برق پایه در شبکه ایفا می‌کنند (Zhang et al., ۲۰۲۲). از منظر سیستم‌های انرژی، ادغام مقادیر عظیمی از انرژی خورشیدی متناوب در شبکه‌های برق، نیازمند تحول در معماری و مدیریت شبکه است. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در حال حاضر برای پیش‌بینی دقیق‌تر تولید انرژی خورشیدی و بهینه‌سازی توزیع بار به‌کار گرفته می‌شوند (Wang

et al., ۲۰۲۳). همچنین، توسعه‌ی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه باتری‌های لیتیم-یون با چگالی انرژی فزاینده و هزینه‌های نزولی، و همچنین فناوری‌های نوظهور مانند ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، کلید غلبه‌بر مشکل متناوب بودن خورشید هستند (Luo et al., ۲۰۲۲). از جنبه‌ی پایداری، اگرچه انرژی خورشیدی در مرحله‌ی بهره‌برداری هیچ گونه آلایندگی گازهای گلخانه‌ای ندارد، اما ارزیابی چرخه‌ی عمر کامل آن از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر و بازیافت، امری ضروری است. مطالعات نشان می‌دهند که طراحی ماژول‌ها برای قابلیت بازیابی و بازیافت بهتر، همراه با توسعه‌ی فرآیندهای هیدرومتالورژی کارآمد برای بازیابی فلزات ارزشمند از پنل‌های مستعمل، می‌تواند ردپای زیست‌محیطی آن را به‌طور چشمگیری کاهش دهد (Latunussa et al., ۲۰۲۳). علاوه‌بر این، مدل‌های کسب‌وکار غیرمتمرکز، مانند نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس کوچک و جامعه‌محور، امکان دسترسی عادلانه‌تر به انرژی پاک را برای جوامع دورافتاده و در حال توسعه فراهم می‌سازند و تاب‌آوری سیستم انرژی را افزایش می‌دهند (IRENA, ۲۰۲۳).

انرژی خورشیدی

بی‌تردید، انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی و امیدبخش گذار از سیستم‌های انرژی متکی بر سوخت‌های فسیلی به سوی آینده‌ای پایدار و کربن‌زدایی‌شده، ایفای نقش می‌کند. این شکل از انرژی، که از تبدیل مستقیم نور خورشید به سایر فرم‌ها قابل استفاده انرژی به دست می‌آید، عمدتاً از طریق دو فناوری اصلی گسترش یافته است: فتوولتائیک (PV) و حرارتی خورشیدی. فناوری فتوولتائیک، که مبتنی‌بر اثر فتوولتائیک، فوتون‌های نور را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند، شاهد پیشرفت‌های خیره‌کننده‌ای در دهه‌های اخیر بوده است. سلول‌های سیلیکونی بلورین، اعم از مونوکریستال و پلی‌کریستال، با راندمانی در محدوده ۱۸ تا ۲۲ درصد برای ماژول‌های تجاری، هنوز سهم غالب بازار (بالای ۹۰ درصد) را در اختیار دارند. با این حال، فناوری‌های نسل جدید مانند سلول‌های لایه‌نازک (CIGS، CdTe) و به‌ویژه سلول‌های پروسکایت، با هزینه‌های تولید پایین‌تر و قابلیت انعطاف در کاربرد، افق‌های تازه‌ای را گشوده‌اند. پژوهش‌های پیش‌گامانه در زمینه سلول‌های تاندمی، که در آن‌ها پروسکایت و سیلیکون برای جذب بخش‌های مختلف طیف نور با یکدیگر همکاری می‌کنند، به رکوردهای راندمانی فراتر از ۳۳ درصد در شرایط آزمایشگاهی دست یافته‌اند که پتانسیل ذاتی این فناوری را برای شکستن محدودیت‌های تئوری شاکلی-کوییسر به‌وضوح نشان می‌دهد. چالش اصلی در مسیر تجاری‌سازی گسترده این فناوری‌های نوین، پایدارسازی آن‌ها در مقیاس بزرگ و در برابر عوامل مخرب محیطی مانند رطوبت، اکسیژن و تنش‌های حرارتی است. در کنار فتوولتائیک، سیستم‌های حرارتی خورشیدی (CSP) با متمرکز کردن پرتوهای خورشید برای گرم کردن یک سیال و در نهایت به حرکت درآوردن توربین‌های بخار، نقش مکمل و حیاتی در تأمین برق پایه در شبکه ایفا می‌کنند. مزیت بزرگ این سیستم‌ها، قابلیت ذاتی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای چندین ساعت است که امکان تولید برق حتی در ساعات پس از غروب خورشید را فراهم می‌سازد. از منظر سیستم‌های انرژی، ادغام مقادیر عظیمی از انرژی خورشیدی متناوب و وابسته به شرایط جوی در شبکه‌های برق، یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های پیش رو است. این ادغام نیازمند تحول اساسی در معماری، بهره‌برداری و مدیریت شبکه است. در این زمینه، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌عنوان ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی دقیق‌تر تولید انرژی خورشیدی (با تحلیل داده‌های تاریخی و تصاویر ماهواره‌ای) و بهینه‌سازی توزیع بلادرنگ بار به‌کار گرفته می‌شوند. توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، کلید غلبه‌بر مشکل متناوب بودن خورشید محسوب می‌شود. باتری‌های لیتیوم-یون در حال حاضر گزینه غالب هستند، اما فناوری‌های دیگری مانند ذخیره‌سازی پمپ‌تلمبه، ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES)، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و باتری‌های جریان‌دار نیز در حال توسعه و کاربرد هستند. از جنبه پایداری و اقتصاد چرخشی، اگرچه انرژی خورشیدی در مرحله بهره‌برداری هیچ گونه آلایندگی گازهای گلخانه‌ای ندارد، اما ارزیابی چرخه عمر کامل آن از استخراج مواد اولیه (مانند کوارتز برای سیلیکون، یا فلزات کمیاب در برخی فناوری‌ها) تا ساخت، نصب، بهره‌برداری و در نهایت پایان عمر و بازیافت امری ضروری است. حجم عظیم پنل‌های خورشیدی که به پایان عمر مفید خود (معمولاً ۲۵ تا ۳۰ سال) می‌رسند، چالش زیست‌محیطی قابل

توجهی را ایجاد خواهد کرد. بنابراین، طراحی ماژول‌ها برای قابلیت بازیابی و بازیافت بهتر، همراه با توسعه فرآیندهای هیدرومتالورژی و حرارتی-مکانیکی کارآمد برای بازیابی شیشه، آلومینیم، سیلیکون، نقره و حتی ایندیم و تلوریم، می‌تواند ردپای زیست‌محیطی آن را به طور چشمگیری کاهش داده و یک اقتصاد چرخشی قوی را برای این صنعت ایجاد کند. علاوه‌بر این، مدل‌های کسب‌وکار غیرمتمرکز، مانند سامانه‌های خورشیدی پشت بامی، نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس کوچک و جامعه‌محور، امکان دسترسی عادلانه‌تر به انرژی پاک را برای جوامع دورافتاده و در حال توسعه فراهم می‌سازند. این مدل‌ها نه‌تنها تاب‌آوری سیستم انرژی را در برابر حوادث طبیعی و اختلالات افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند منجر به دموکراتیک‌سازی سیستم انرژی و ایجاد مشاغل سبز محلی شوند. در نهایت، چشم‌انداز بلندمدت انرژی خورشیدی، حرکت به‌سمت "شبکه‌های هوشمند" کاملاً یکپارچه است که در آن میلیون‌ها نیروگاه کوچک و بزرگ خورشیدی، همراه با سیستم‌های ذخیره‌سازی توزیع‌شده، یک سیستم انرژی انعطاف‌پذیر، مقاوم و پاک را تشکیل می‌دهند.

خورشید، به‌عنوان یک رآکتور همجوشی هسته‌ای طبیعی و بی‌خطر، بیش از ۱۰۰۰۰ برابر انرژی مورد نیاز سالانه تمدن بشری را در هر لحظه به‌سمت زمین گسیل می‌دارد. بهره‌گیری از این انرژی عظیم و رایگان، نیازمند توسعه فناوری‌های کارآمد و مقرون به صرفه است. در این مسیر، نوآوری در معماری سلول‌های خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. سلول‌های نسل سوم مبتنی‌بر نانوذرات کوانتومی و نقاط کوانتومی، با قابلیت تنظیم گاف انرژی از طریق کنترل اندازه ذرات، امکان بهره‌برداری از بخش‌های وسیع‌تری از طیف خورشیدی را فراهم ساخته‌اند. این فناوری‌ها همچنین پتانسیل تولید سلول‌های تاندم (tandem) چنداتصالی با راندمان‌های نظری فراتر از ۴۵ درصد را دارا می‌باشند. در کنار این پیشرفت‌ها، توسعه سلول‌های خورشیدی ارگانیک و مبتنی‌بر پروسکایت‌های هالید فلزی، با قابلیت چاپ در ابعاد وسیع و هزینه تولید پایین، انقلابی در کاربردهای building-integrated photovoltaics ایجاد کرده است. از منظر سیستم‌های انرژی، مفهوم virtual power plants به‌عنوان پارادایمی نوظهور، امکان تجمیع هزاران سیستم خورشیدی پراکنده و مدیریت هوشمند آن‌ها را به‌عنوان یک نیروگاه واحد فراهم می‌سازد. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند، امکان مشارکت فعال مصرف‌کنندگان در بازارهای برق را ممکن ساخته‌اند. در حوزه ذخیره‌سازی انرژی، توسعه باتری‌های حالت جامد با ایمنی بالاتر و چگالی انرژی فزاینده، همراه با پیشرفت در فناوری هیدروژن سبز تولید شده از الکترولیزرهای تغذیه شده با انرژی خورشیدی، راهکارهای جامعی برای ذخیره‌سازی بین‌فصلی این انرژی ارائه می‌دهند. از دیدگاه زیست‌محیطی، ارزیابی چرخه حیقتوسعه یافته نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و بازیافت، می‌توان زمان بازگشت انرژی سیستم‌های فتوولتائیک را به کمتر از ۶ ماه کاهش داد. همچنین، سیستم‌های کشاورزی-ولتائیک (agrivoltaics)، که ترکیبی از تولید انرژی خورشیدی و کشاورزی هستند، امکان استفاده بهینه از زمین را فراهم آورده و می‌توانند بازدهی کلی زمین را تا ۶۰ درصد افزایش دهند. در مقیاس کلان، پروژه‌های عظیم خورشیدی در مناطق بیابانی با پتانسیل تولید چندین تراوات انرژی، همراه با توسعه شبکه‌های انتقال HVDC، می‌توانند نیاز انرژی چندین منطقه را به‌صورت هم‌زمان تأمین نمایند. این چشم‌انداز، نیازمند همکاری بین‌المللی و توسعه زیرساخت‌های انرژی فراگیر است.

در ادامه بررسی جامع انرژی خورشیدی، باید به جنبه‌های پیشرفته‌تر این فناوری پرداخت. سیستم‌های فتوولتائیک شناور (FPV) به‌عنوان راهکاری نوین برای بهره‌برداری از سطوح آبی، هم‌زمان با کاهش تبخیر آب و بهبود بازده ماژول‌ها از طریق خنک‌سازی طبیعی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات نشان می‌دهند این سیستم‌ها می‌توانند تا ۱۰ درصد بازده بیشتری نسبت به نمونه‌های زمینی داشته باشند. در حوزه مواد پیشرفته، نسل جدید سلول‌های خورشیدی پروسکایت-سیلیکون تاندم در آستانه تجاری‌سازی

قرار دارند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به راندمان ۴۰ درصد در مقیاس صنعتی دست یابند. همچنین، توسعه سلول‌های خورشیدی چنداتصالی با بهره‌گیری از نیمه‌هادی‌های III-V، رکورد راندیم آزمایشگاهی را به ۴۷.۱ درصد رسانده‌اند. از منظر شبکه‌های هوشمند، ادغام سیستم‌های خورشیدی با خودروهای برقی (V۲G) و توسعه ریز شبکه‌های هوشمند، پارادایم جدیدی در مدیریت انرژی ایجاد کرده‌اند. این سیستم‌ها قادرند پایداری شبکه را افزایش داده و سهم انرژی خورشیدی در ترکیب انرژی را تا ۸۰ درصد در برخی مناطق امکان‌پذیر سازند. در زمینه ذخیره‌سازی، فناوری‌های نوظهور مانند باتری‌های روی-هوا و باتری‌های جریانی وانادیومی، پتانسیل کاهش هزینه ذخیره‌سازی به زیر ۱۰۰ دلار بر کیلووات‌ساعت را دارا می‌باشند. از دیدگاه اقتصادی، هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی در یک دهه گذشته بیش از ۸۵ درصد کاهش یافته و در بسیاری از مناطق جهان به پایین‌ترین سطح تاریخ رسیده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، هزینه تولید برق از سیستم‌های فتوولتائیک مقیاس- سودمندی به کم‌تر از ۰.۰۱ دلار بر کیلووات‌ساعت برسد. در حوزه پایداری، توسعه روش‌های بازیافت هیدرومتالورژی برای بازیابی بیش از ۹۵ درصد مواد ارزشمند از پنل‌های مستعمل، اقتصاد چرخشی کاملی را برای این صنعت ایجاد کرده است. همچنین، ارزیابی‌های چرخه حیات پیشرفته نشان می‌دهد که سیستم‌های خورشیدی مدرن دارای بازگشت انرژی در مدت کمتر از ۶ ماه هستند.

راندمان این انرژی

راندمان انرژی خورشیدی به زمینه‌ی مورد بحث بستگی دارد و می‌توان آن را از دو منظر اصلی بررسی کرد:

۱. راندمان تبدیل (Conversion Efficiency)

این راندمان مربوط به تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته توسط سلول‌های فتوولتائیک (PV) یا به حرارت توسط کلکتورهای خورشیدی است.

الف) فتوولتائیک (برق خورشیدی):

سلول‌های آزمایشگاهی (رقم رکورد):

سلول تاندم پروسکایت/سیلیکون: رکوردکنندهی فعلی جهان با ٪۳۳.۹ (طبق آخرین به‌روزرسانی NREL در سال ۲۰۲۴).

سلول چنداتصالی (III-V): این سلول‌ها که در فناوری فضایی کاربرد دارند، به رکورد ٪۴۷.۶ تحت نور متمرکز دست یافته‌اند.

سلول‌های تجاری رایج در بازار:

سیلیکون مونوکریستال (Mono-c-Si): بین ٪۲۲ تا ٪۲۴.۵

سیلیکون پلی‌کریستال (Poly-c-Si): بین ٪۱۸ تا ٪۲۰

لایه نازک CIGS: بین ٪۱۶ تا ٪۲۰

لایه نازک CdTe: بین ٪۱۸ تا ٪۲۱ماژول کامل (پنل): راندمان یک پنل کامل به‌دلیل وجود فاصله بین سلول‌ها و قاب، معمولاً ۲-۱ درصد کمتر از راندمان سلول است و برای بهترین پنل‌های سیلیکونی به ~٪۲۳ می‌رسد.

ب) سیستم‌های حرارتی خورشیدی (CSP):

راندمان این سیستم‌ها در تبدیل نور خورشید به الکتریسیته معمولاً بین ٪۱۶ تا ٪۲۵ است. نقطه قوت اصلی آن‌ها قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی مقرون‌به‌صرفه است که "راندمان ظرفیت" بالایی را برای ساعات طولانی فراهم می‌کند.

۲. راندمان کلی سیستم (Overall System Efficiency)

این راندمان، بازدهی کل نیروگاه یا سامانه خورشیدی از نور خورشید تا تحویل برق به شبکه را در نظر می‌گیرد و عوامل زیر بر آن تأثیر می‌گذارند:

اتلاف inverter (اینورتر): حدود ٪۴-۲

اتلاف سیم‌ها و کابل‌ها: حدود ٪۲-۱

اتلاف ناشی از دما: با افزایش دما، راندمان سلول‌ها کاهش می‌یابد (معمولاً ۰.۳٪ تا ۰.۵٪ به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش بالاتر از ۲۵° C)

اتلاف ناشی از غبار و آلودگی: بین ۲٪ تا ۱۰٪ بسته به شرایط محیطی.

اتلاف ناشی از سایه‌اندازی: حتی سایه‌ی جزئی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بگذارد.

در نتیجه، راندمان عملیاتی کلی یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه، معمولاً بین ۱۵٪ تا ۲۰٪ از انرژی نور خورشید ورودی است.

نکته کلیدی:

اگرچه این ارقام در نگاه اول پایین به نظر می‌رسند، اما باید در نظر داشت که:

منبع انرژی (خورشید) رایگان و بی‌پایان است.

هزینه‌های تولید به‌شدت کاهش یافته و اکنون انرژی خورشیدی به رقابتی‌ترین منبع تولید برق جدید در تاریخ تبدیل شده است (IRENA, ۲۰۲۳).

پژوهش‌های فشرده در زمینه‌هایی مانند سلول‌های تاندم، نانوذرات و مواد جدید (مانند پروسکایت‌ها) به‌طور مستمر در حال افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها هستند.

مزایا

مسلماً انرژی خورشیدی دارای مزایای متعددی است که آن را به یکی از جذاب‌ترین گزینه‌ها در سبد انرژی جهانی تبدیل کرده است. در ادامه به بررسی جامع این مزایا پرداخته می‌شود:

۱. مزایای زیست‌محیطی

پاک و عاری از آلایندگی: انرژی خورشیدی در حین بهره‌برداری هیچ‌گونه آلایندگی هوا، گازهای گلخانه‌ای یا پسماندهای سمی تولید نمی‌کند. این ویژگی به‌طور مستقیم به بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌کند (IPCC, ۲۰۲۲).

کاهش ردپای کربن: یک سیستم فتوولتائیک معمولی به‌ازای هر مگاوات‌ساعت برق تولیدی، حدود ۰٫۹ تن کربن‌دی‌اکسید کم‌تر در مقایسه با نیروگاه‌های زغال‌سنگ منتشر می‌کند (NREL, ۲۰۲۳).

حفظ منابع آبی: برخلاف نیروگاه‌های حرارتی سنتی که به مقادیر عظیمی آب برای خنک‌کاری نیاز دارند، سیستم‌های فتوولتائیک به‌هیچ‌وجه آب مصرف نمی‌کنند.

۲. مزایای اقتصادی

کاهش هزینه‌های تولید: هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی در دهه گذشته بیش از ۸۵٪ کاهش یافته و در بسیاری از مناطق جهان به پایین‌ترین سطح تاریخ رسیده است (IRENA, ۲۰۲۳).

ایجاد امنیت انرژی: با استفاده از انرژی خورشیدی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی وارداتی کاهش یافته و کشورها در برابر نوسانات قیمت جهانی انرژی مصونیت می‌یابند.

توسعه اشتغال: صنعت انرژی خورشیدی یکی از سریع‌الرشدترین بخش‌های اشتغال‌زاست. بر اساس گزارش‌ها، این صنعت در سطح جهانی بیش از ۴٫۹ میلیون شغل مستقیم ایجاد کرده است (IRENA, ۲۰۲۳).

۳. مزایای فنی و عملیاتی

مدولار بودن: سیستم‌های خورشیدی را می‌توان در هر مقیاسی، از نیروگاه‌های عظیم چندمگاواتی تا سیستم‌های کوچک پشت‌بامی، نصب و راه‌اندازی کرد.

امکان نصب غیرمتمرکز: این ویژگی امکان تولید برق در محل مصرف را فراهم می‌کند که موجب کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی می‌شود.

هزینه نگهداری پایین: سیستم‌های فتوولتائیک دارای قطعات متحرک نیستند و بنابراین نیاز به نگهداری کمی دارند.

۴. مزایای اجتماعی

دسترسی به انرژی برای مناطق دورافتاده: در مناطقی که به شبکه سراسری برق دسترسی ندارند، سیستم‌های خورشیدی می‌توانند برق پاک و مقرون‌به‌صرفه تأمین کنند.

افزایش عدالت انرژی: انرژی خورشیدی این امکان را به خانوارها و کسب‌وکارهای کوچک می‌دهد که خود تولیدکننده برق باشند.

انعطاف‌پذیری در کاربرد: از انرژی خورشیدی می‌توان برای کاربردهای متنوعی از تولید برق گرفته تا گرمایش آب، سرمایش و حتی شیرین‌سازی آب استفاده کرد.

۵. مزایای بلندمدت

منبع بی‌پایان: انرژی خورشیدی برخلاف سوخت‌های فسیلی، منبعی تجدیدپذیر و تقریباً بی‌پایان است.

افزایش قابلیت اطمینان شبکه: در ترکیب با سیستم‌های ذخیره‌سازی، انرژی خورشیدی می‌تواند به افزایش پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق کمک کند.

سازگاری با فناوری‌های نوین: انرژی خورشیدی به‌خوبی با فناوری‌های مدرن مانند خودروهای برقی، ساختمان‌های هوشمند و شبکه‌های هوشمند سازگاری دارد.

معایب

مسلماً در کنار مزایای متعدد، انرژی خورشیدی با چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز روبرو است که برای برنامه‌ریزی و توسعه پایدار این فناوری باید به دقت مورد توجه قرار گیرند.

۱. چالش‌های فنی و عملیاتی

متناوب بودن و وابستگی به شرایط جوی: تولید انرژی خورشیدی کاملاً وابسته به تابش خورشید است و در شب، هوای ابری شدید و بارانی متوقف می‌شود. این متناوب بودن، چالش بزرگی برای پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق ایجاد می‌کند و نیازمند سرمایه‌گذاری سنگین در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی یا نیروگاه‌های پشتیبان است (Denholm et al., ۲۰۲۱).

چگالی انرژی پایین: انرژی خورشیدی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی یا انرژی هسته‌ای، چگالی انرژی کمتری دارد. این به‌معنای نیاز به سطح وسیع‌تری از زمین برای نصب پنل‌ها جهت تولید مقدار قابل توجهی برق است. برای مثال، یک نیروگاه خورشیدی بزرگ ممکن است به ده‌ها هکتار زمین نیاز داشته باشد.

وابستگی بازده به دما: بازده سلول‌های فتوولتائیک با افزایش دما کاهش می‌یابد. در روزهای بسیار گرم که اوج مصرف انرژی برای سرمایش رخ می‌دهد، بازده پنل‌ها ممکن است تا ۱۰ تا ۲۵ درصد افت کند.

۲. چالش‌های اقتصادی و زیرساختی

هزینه سرمایه اولیه بالا: اگرچه هزینه برق تولیدی (LCOE) کاهش یافته، اما هزینه اولیه خرید و نصب سیستم‌های خورشیدی هنوز می‌تواند برای خانوارها و کسب‌وکارها قابل توجه باشد.

نیاز به زیرساخت‌های جدید شبکه: ادغام مقادیر زیاد انرژی خورشیدی متناوب در شبکه‌های برق سنتی، که برای نیروگاه‌های متمرکز و قابل کنترل طراحی شده‌اند، نیاز به مدرنیزه کردن گسترده شبکه، شامل اینورترهای پیشرفته، سیستم‌های کنترل و خطوط انتقال جدید دارد (IEA, ۲۰۲۳).

هزینه‌های پنهان سیستم: هزینه‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری، تعمیر و نگهداری و در نهایت بازیافت پنل‌ها، از جمله هزینه‌های اضافی هستند که باید در محاسبات اقتصادی در نظر گرفته شوند.

۳. چالش‌های زیست‌محیطی و منابعی

تأثیرات چرخه عمر و پسماند: فرآیند تولید سلول‌های خورشیدی مصرف کننده انرژی و آب است و ممکن است درگیر استفاده از مواد شیمیایی باشد. مهم‌تر از آن، مدیریت پسماند پنل‌های خورشیدی در پایان عمر مفیدشان (معمولاً ۳۰-۲۵ سال) به یک چالش زیست‌محیطی جدی تبدیل شده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، حجم پسماند پنل‌های خورشیدی به ۷۸ میلیون تن در سطح جهانی برسد (IRENA & IEA-PVPS, ۲۰۲۳).

مصرف زمین: احداث نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی می‌تواند منجر به تغییر کاربری اراضی، از بین رفتن پوشش گیاهی طبیعی و پتانسیل تاثیر بر حیات وحش محلی شود.

ردپای کربن در فرآیند تولید: اگرچه در مرحله بهره‌برداری آلایندگی صفر است، اما تولید پنل‌ها، به‌ویژه در مناطقی که شبکه برق آن‌ها مبتنی بر سوخت فسیلی است، می‌تواند ردپای کربن قابل توجهی داشته باشد.

۴. چالش‌های فناوری و منابعی

وابستگی به مواد اولیه خاص: تولید برخی از فناوری‌های خورشیدی پیشرفته (مانند سلول‌های CIGS یا برخی پروسکایت‌ها) به مواد اولیه کم‌یاب یا فلزات خاصی مانند ایندیم، تلوریم و سلنیم وابسته است که می‌تواند از نظر زنجیره تأمین آسیب‌پذیر باشد (IEA, ۲۰۲۳).

اتلاف انرژی در تبدیل: با وجود پیشرفت‌ها، راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به برق هنوز محدود است و بخش عمده‌ای از انرژی خورشیدی تابیده شده به پنل (حدود ٪۸۰) به‌صورت گرما تلف می‌شود.

محدودیت‌ها

محدودیت‌های انرژی خورشیدی را می‌توان به شرح زیر طبقه‌بندی و تشریح نمود:

۱. محدودیت‌های ذاتی و فنی

متناوب بودن و عدم قطعیت در تولید: تولید برق از انرژی خورشیدی کاملاً وابسته به تابش خورشید است و در طول شب، هوای بسیار ابری و بارانی متوقف می‌شود. این ویژگی، آن را به منبعی غیرقابل اعتماد برای تأمین برق پایه (Base Load) تبدیل می‌کند. حتی تغییرات سریع ابری می‌تواند موجب نوسانات شدید و سریع در خروجی نیروگاه شود که برای پایداری شبکه چالش‌برانگیز است (Denholm et al., ۲۰۲۱).

چگالی توان پایین: انرژی خورشیدی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی یا انرژی هسته‌ای، از چگالی توان (توان در واحد سطح) نسبتاً پایینی برخوردار است. این امر برای تولید مقدار قابل توجهی برق، به سطح وسیعی از زمین نیاز دارد. برای مثال، یک نیروگاه خورشیدی در مقیاس سودمندی ممکن است به ازای هر مگاوات قدرت، به ۲ تا ۵ هکتار زمین نیاز داشته باشد که این موضوع در مناطق با تراکم جمعیت بالا یا زمین‌های با ارزش کشاورزی به یک محدودیت جدی تبدیل می‌شود.

راندمان تبدیل محدود: با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، راندمان تبدیل انرژی نورانی به الکتریسیته در پنل‌های تجاری رایج عمدتاً بین ۱۵٪ تا ۲۲٪ است. این بدان معناست که بخش عمده‌ای از انرژی خورشیدی تابیده شده (حدود ۸۰٪) بدون استفاده تلف می‌شود (NREL, ۲۰۲۳).

وابستگی بازده به دما: بازده سلول‌های فتوولتائیک با افزایش دما کاهش می‌یابد. در روزهای بسیار گرم که اوج مصرف انرژی برای سیستم‌های سرمایشی رخ می‌دهد، بازده پنل‌ها می‌تواند به‌طور محسوسی افت کند که این یک تناقض و چالش عملیاتی ایجاد می‌نماید.

۲. محدودیت‌های اقتصادی و زیرساختی

هزینه سرمایه اولیه بالا: اگرچه هزینه سطحی شده برق (LCOE) انرژی خورشیدی به‌طور پیوسته کاهش یافته، اما هزینه اولیه نقدی برای خرید و نصب سیستم (شامل پنل‌ها، سازه، اینورتر و نصب) هنوز می‌تواند مانعی برای استقرار گسترده، به‌ویژه برای خانوارها و کسب‌وکارهای کوچک باشد.

نیاز به توسعه گسترده شبکه و ذخیره‌سازی: ادغام سطوح بالای انرژی خورشیدی در شبکه‌های برق سنتی، که برای نیروگاه‌های متمرکز و قابل پیش‌بینی طراحی شده‌اند، مستلزم سرمایه‌گذاری سنگین در به‌روزرسانی و تقویت شبکه است. این مدرنیزاسیون شامل خطوط انتقال جدید، سیستم‌های کنترل پیشرفته و مهم‌تر از همه، توسعه گسترده فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی (مانند باتری‌ها) برای پوشش تولید در ساعات بدون تابش است که هزینه کل سیستم را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (IEA, ۲۰۲۳).

۳. محدودیت‌های زیست‌محیطی و منابعی

چالش مدیریت پسماند در پایان عمر: پنل‌های خورشیدی عمر مفیدی در حدود ۲۵ تا ۳۰ سال دارند. حجم عظیم پسماند این پنل‌ها که در دهه‌های آینده به پایان عمر خود می‌رسند، یک چالش زیست‌محیطی جدی ایجاد می‌کند. در حال حاضر، زیرساخت‌های بازیافت صنعتی و مقرون‌به‌صرفه برای این پسماندها به اندازه کافی توسعه نیافته است (IRENA & IEA-PVPS, ۲۰۲۳).

مصرف مواد اولیه خاص و کم‌یاب: تولید پنل‌های خورشیدی به مواد خاصی مانند سیلیکون با درجه خلوص بسیار بالا، نقره (برای نوارهای رابط) و در مورد فناوری‌های لایه نازک، موادی مانند ایندیم، تلوریم و سلنیم وابسته است. تمرکز جغرافیایی عرضه برخی از این مواد، می‌تواند وظایف ریسک در زنجیره تأمین جهانی ایجاد کند (IEA, ۲۰۲۳).

تأثیرات زیست‌محیطی تولید: فرآیند تولید ویفرهای سیلیکونی و سلول‌های خورشیدی، مصرف‌کننده مقادیر قابل توجهی انرژی و آب است و ممکن است درگیر استفاده از مواد شیمیایی باشد که در صورت مدیریت نادرست، می‌توانند اثرات زیست‌محیطی بر جای گذارند.

۴. محدودیت‌های جغرافیایی و مکانی

توزیع ناهمگون منابع: پتانسیل انرژی خورشیدی در سطح کره زمین به‌طور یکنواخت توزیع نشده است. مناطق بیابانی نزدیک به استوا دارای بالاترین پتانسیل هستند، در حالی که مناطق مرتفع با عرض جغرافیایی بالا و آب‌وهوای اغلب ابری، پتانسیل کمتری دارند. این ناهم‌گونی، لزوم توسعه خطوط انتقال بین‌المللی طولانی و پرهزینه را مطرح می‌سازد.

در ادامه، مزایا، معایب و محدودیت‌های انرژی خورشیدی به صورت جدولی مقایسه‌ای ارائه شده است.

جدول ۱: جدول مقایسه‌ای مزایا، معایب و محدودیت‌های انرژی خورشیدی

شاخه	توضیح مزایا، معایب (کاستی‌ها و چالش‌های قابل بهبود) یا محدودیت‌ها (موانع ذاتی و دشوار برای تغییر)
زیست‌محیطی	- عدم تولید گازهای گلخانه‌ای در حین بهره‌برداری
	- کاهش آلودگی هوا و آب
	- کمک به کاهش تغییرات اقلیمی
	- کاهش مصرف آب در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی

	- تأثیرات زیست‌محیطی مرحله تولید (مصرف انرژی و آب)
	- چالش مدیریت پسماند پنل‌های پایان عمر
	- ردپای کربن در فرآیند تولید (در صورت استفاده از برق مبتنی‌بر سوخت فسیلی)
	- پتانسیل تاثیر بر کاربری اراضی و اکوسیستم محلی در صورت اجرای پروژه‌های بزرگ
اقتصادی	- کاهش شدید هزینه‌های تولید برق در دهه گذشته
	- هزینه عملیاتی و نگهداری پایین
	- ایجاد امنیت انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی
	- ایجاد میلیون‌ها شغل مستقیم و غیرمستقیم
	- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا
	- نیاز به سرمایه‌گذاری گسترده در شبکه و ذخیره‌سازی
	- هزینه‌های پنهان (بازیافت، تعویض اینورتر)
	- وابستگی اقتصادی به یارانه‌ها و سیاست‌های حمایتی در مراحل اولیه توسعه بازار
فنی و عملیاتی	- منبعی تجدیدپذیر و تقریباً بی‌پایان
	- امکان نصب در مقیاس‌های مختلف (از نیروگاه بزرگ تا پشت‌بامی)
	- امکان تولید در محل مصرف (کاهش تلفات انتقال)
	- بدون قطعه متحرک و استهلاک کم
	- راندمان تبدیل محدود در فناوری‌های رایج
	- وابستگی بازده به دما (افت بازده در هوای گرم)
	- نیاز به تعمیر و نگهداری تخصصی برای برخی اجزا (مانند اینورتر)
	- متناوب بودن و وابستگی مطلق به شرایط جوی (شب، ابر، باران)
	- چگالی توان پایین (نیاز ذاتی به سطح وسیع زمین)
زیرساخت و منابع	- در دسترس بودن در اکثر نقاط جهان
	- امکان توسعه سریع و مدولار
	- سازگاری با فناوری‌های نوین (شبکه هوشمند، خودروی برقی)
	- وابستگی به مواد اولیه خاص و کمیاب در برخی فناوری‌ها (مانند نقره، ایندیوم)
	- نیاز به مدرنیزه کردن گسترده زیرساخت شبکه
	- توزیع ناهمگون پتانسیل خورشیدی در سطح زمین (ذاتی در جغرافیا و اقلیم)
اجتماعی و سیاسی	- دموکراتیک کردن سیستم انرژی
	- تأمین برق برای جوامع دورافتاده و محروم
	- افزایش تاب‌آوری و استقلال انرژی محلی
	- چالش‌های مقررات‌گذاری و سیاست‌گذاری برای توسعه غیرمتمرکز
	- پتانسیل مناقشات بر سر کاربری زمین برای نیروگاه‌های بزرگ
	- مقاومت ذی‌نفعان سنتی بخش انرژی در برابر تغییر ساختار بازار

تفسیر جدول:

محدودیت‌ها (مانند متناوب بودن و توزیع ناهم‌گون منابع) ویژگی‌های ذاتی انرژی خورشیدی هستند که نمی‌توان آن‌ها را به‌طور کامل حذف کرد، بلکه فقط می‌توان با فناوری‌هایی مانند ذخیره‌سازی انرژی و خطوط انتقال اثرات آن‌ها را مدیریت کرد.

معایب (مانند هزینه اولیه بالا یا چالش بازیافت) کاستی‌هایی هستند که در اصل با پیشرفت فناوری، اقتصاد مقیاس و تصمیم‌گیری هوشمندانه سیاستی قابل کاهش یا رفع هستند.

نحوه افزایش راندمان

افزایش راندمان سیستم‌های انرژی خورشیدی یک هدف چندوجهی است که در سطوح مختلف مواد، سلول، ماژول و سیستم قابل پیگیری است. در سطح مواد و سلول، تحقیقات بر روی توسعه مواد پیشرفته مانند سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون متمرکز شده است که با بهره‌گیری از مکمل‌سازی طیفی، رکورد راندمان آزمایشگاهی را به بیش از ٪۳۳ رسانده‌اند. این سلول‌ها با جذب بخش‌های مختلف طیف خورشید (پروسکایت برای نور مرئی و سیلیکون برای نور مادون قرمز)، محدودیت تئوری شاکلی-کوییسر سلول‌های تکلایه را می‌شکنند. هم‌زمان، استفاده از لایه‌های پسیواسیون با کیفیت بالا (مانند اکسیدهای آلومینیم یا سیلیکون نیترید) برای کاهش بازترکیب حامل‌های بار در سطح سلول، به‌طور محسوسی راندمان را افزایش می‌دهد. افزودن لایه‌های ضدبازتابش نانوساختار و استفاده از طرح‌های مهندسی‌شده برای تماس‌های فلزی (مانند طرح‌های finger) نیز تلفات نوری و الکتریکی را به حداقل می‌رساند. در سطح ماژول و سیستم، بهینه‌سازی طراحی آرایه از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از سیستم‌های ردیاب خورشیدی (Tracker) که پنل‌ها را در طول روز به‌طور پیوسته در راستای خورشید قرار می‌دهند، می‌تواند انرژی دریافتی سالانه را تا ٪۲۵ در مقایسه با سیستم‌های ثابت افزایش دهد. مدیریت حرارتی موثر نیز یک عامل کلیدی است، چرا که افزایش دما باعث کاهش راندمان سلول می‌شود. راهکارهایی مانند استفاده از هیت‌سینک‌های پسیو، خنک‌کاری هیدرولیک یا نصب پنل‌ها به صورتی که جریان هوا به‌خوبی پشت آن‌ها جریان یابد، می‌تواند دمای عملیاتی را کاهش داده و بازده را حفظ کند. برای سیستم‌های فتوولتائیک متمرکز (CPV)، استفاده از اپتیک‌های پیشرفته برای متمرکز کردن نور بر روی سلول‌های کوچک و بسیار کارآمد (با راندمان بیش از ٪۴۰) یک راهکار دیگر برای افزایش راندمان کلی است.

در نهایت، ادغام هوشمند سیستم در شبکه و استفاده از اینورترهای پیشرفته با الگوریتم‌های MPPT (ردیابی نقطه حداکثر توان) بسیار کارآمد، تضمین می‌کند که سیستم همواره در نقطه بهینه خود کار می‌کند. این اینورترها قادرند با تطبیق سریع با شرایط سایه‌اندازی جزئی یا تغییرات سریع تابش، تلفات را به حداقل برسانند. ترکیب این راهکارها در کنار یکدیگر از پیشرفت‌های نانومواد در آزمایشگاه تا بهینه‌سازی‌های هوشمند در مقیاس نیروگاه، مسیر دستیابی به راندمان‌های بالاتر و در نتیجه، کاهش بیشتر هزینه انرژی خورشیدی را هموار می‌سازد.

این نوع انرژی، در چه اقلیم ها و شرایط اب و هوایی، قابل استحصال است؟ (مثلا آیا در دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس با درصد رطوبت ۱٪ قابل استفاده است)

پاسخ به این پرسش کلیدی است: انرژی خورشیدی در طیف گسترده‌ای از اقلیم‌ها و شرایط آب‌وهوایی قابل استحصال است، اما بازده و میزان تولید آن به‌شدت تحت‌تأثیر این شرایط قرار می‌گیرد. در مورد این مثال خاص (دمای ۵۰ درجه سلسیوس و رطوبت ٪۱) باید گفت: بله، کاملاً قابل استفاده و حتی در برخی جنبه‌ها بسیار مطلوب است، اما با چالش‌های مهمی همراه خواهد بود.

در جدول زیر، قابلیت استحصال و عملکرد انرژی خورشیدی در انواع اقلیم‌ها و شرایط خاص مقایسه شده است:

جدول ۲. قیاس شرایط آب‌وهوایی / اقلیمی، قابلیت استحصال و عملکرد و همچنین ملاحظات و توضیحات کلیدی

شرایط آب‌وهوایی / اقلیمی	قابلیت استحصال و عملکرد	ملاحظات و توضیحات کلیدی

تحلیل جامع پتانسیل‌ها و چالش‌های فناوری‌های انرژی خورشیدی در گذار به سیستم انرژی پایدار: مروری بر آخرین دستاوردها و چشم‌اندازهای آتی

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و محمدمعین رشیدپور

آب‌وهوای گرم و خشک (مثال: ۵۰° C، رطوبت ۱٪) (مانند صحراهای مرکزی ایران، عربستان، آریزونا)	بسیار عالی از نظر تابش چالش‌برانگیز از نظر دما	مزایا: • تعداد روزهای آفتابی بسیار زیاد و میزان تابش مستقیم (DNI) بسیار بالا، که برای تولید انرژی ایده‌آل است. • هوای خشک و عدم وجود ابر، باعث کاهش تلفات جوی و دسترسی به بیشترین پتانسیل خورشیدی می‌شود. معایب و چالش‌ها: • کاهش راندمان پنل‌ها به‌دلیل دمای بالا: به ازای هر درجه افزایش دما بالاتر از ۲۵° C، راندمان پنل‌های سیلیکونی معمولاً بین ۰.۳٪ تا ۰.۵٪ کاهش می‌یابد. در دمای ۵۰° C، این کاهش می‌تواند به ۱۵-۱۰٪ برسد. • تجمع گرد و غبار: هوای خشک و وزش باد منجر به تجمع سریع گرد و غبار روی پنل‌ها می‌شود که می‌تواند تا ۳۰٪ از تولید را کاهش دهد و نیاز به شستشوی مکرر و پرهزینه ایجاد کند.
آب‌وهوای معتدل و آفتابی (مانند مدیترانه، کالیفرنیا)	بهینه و ایده‌آل	مزایا: • تابش خورشیدی قوی و ساعات آفتابی طولانی. • دمای هوای معتدل از overheating پنل‌ها جلوگیری کرده و راندمان را در سطح بالایی نگه می‌دارد. • این شرایط، مطلوب‌ترین حالت برای بیش‌ترین تولید مداوم و با راندمان بالا است.
آب‌وهوای سرد و آفتابی (مانند کوهستان‌های مرتفع، آلپ)	بسیار عالی	مزایا: • هوای سرد باعث افزایش راندمان پنل‌ها می‌شود. • بازتابش نور از برف می‌تواند برفالبد (Albedo effect) تولید را تا ۱۰٪ افزایش دهد. چالش: • چالش اصلی، بارش برف و پوشش آن بر روی پنل‌ها است که نیاز به طراحی ویژه برای زاویه‌ی نصب و سیستم‌های پاک‌کننده دارد.
آب‌وهوای گرم و مرطوب (مانند مناطق حاره‌ای)	متوسط تا خوب	مزایا: • تابش خوب اما اغلب به صورت پراکنده (Diffuse) به دلیل وجود رطوبت و aerosol در هوا. چالش‌ها: • رطوبت بالا می‌تواند باعث تسریع خوردگی قطعات و رشد جلبک بر روی سازه‌ها شود. • کاهش دما بازهم یک مزیت است، اما رطوبت بر کیفیت تابش تأثیر می‌گذارد.
آب‌وهوای ابری و بارانی (مانند شمال اروپا، مناطق معتدل مرطوب)	کم اما قابل توجه	مزایا: • پنل‌های مدرن در تبدیل نور پراکنده نیز نسبتاً خوب عمل می‌کنند. • باران به‌طور طبیعی پنل‌ها را تمیز می‌کند. چالش‌ها: • سیستم‌ها همچنان برق تولید می‌کنند، اما عمدتاً از نور پراکنده و بنابراین تولید به‌شدت کاهش می‌یابد (ممکن است تنها ۲۵-۱۰٪ ظرفیت نامی باشد).

جمع‌بندی نهایی برای شرایط مثال (۵۰° C و رطوبت ۱٪):

پتانسیل خارق‌العاده: این شرایط از نظر میزان انرژی خورشیدی در دسترس، در رده برترین مناطق جهان قرار دارد.

مدیریت چالش دما: برای غلبه‌بر کاهش راندمان ناشی از دما، راهکارهای زیر ضروری است:
استفاده از پنل‌ها با ضریب دمایی پایین‌تر.
نصب پنل‌ها با فاصله‌ی بیشتر از زمین و سقف برای ایجاد جریان هوای بهتر در زیر آن‌ها (خنک‌کاری پسیو).
استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری فعال (مانند خنک‌کاری آبی) برای پروژه‌های بزرگ مقیاس.
مدیریت گرد و غبار: طراحی یک برنامه منظم و خودکار برای شستشوی پنل‌ها با آب (در صورت در دسترس بودن) یا روش‌های تمیزکردن بدون آب (مانند برس‌های خودکار) برای حفظ بازدهی حیاتی است.
نتیجه نهایی: انرژی خورشیدی تقریباً در هر نقطه از کره زمین که نور خورشید وجود دارد، قابل استحصال است. اما اقتصادی بودن و بازدهی آن مستقیماً به تطبیق طراحی سیستم و فناوری با شرایط خاص اقلیمی آن منطقه بستگی دارد. اقلیم گرم و خشک با تابش بالا، یک طلای خورشیدی محسوب می‌شود که تنها نیاز به مدیریت هوشمندانه چالش‌های دما و غبار دارد.

تجهیزات مورد نیاز برای استفاده از این انرژی

سیستم‌های بهره‌برداری از انرژی خورشیدی بسته به نوع خروجی مورد نیاز (برق یا حرارت) و مقیاس کاربرد، به تجهیزات مختلفی نیاز دارند.

تجهیزات جزئی و توضیحات

۱. سیستم‌های فتوولتائیک (تولید برق)

پنل‌های خورشیدی (Solar Panels): قلب سیستم هستند که نور خورشید را به جریان مستقیم (DC) تبدیل می‌کنند. انواع اصلی شامل سیلیکون کریستالی (مونو و پلی) و لایه نازک (CIGS, CdTe) می‌شود.
اینورتر (Inverter): این دستگاه جریان مستقیم (DC) تولید شده توسط پنل‌ها را به جریان متناوب (AC) مورد استفاده در خانه‌ها و شبکه برق تبدیل می‌کند. انواع اصلی عبارتند از:
اینورتر مرکزی (Central): برای نیروگاه‌های بزرگ.
اینورتر سلسله‌ای (String): متداول‌ترین نوع برای سیستم‌های مسکونی و تجاری.
ریزاینورتر (Micro-inverter): روی هر پنل نصب می‌شود و راندمان را در شرایط سایه‌اندگی افزایش می‌دهد.
ساختارهای نصب (Mounting Structures): این سازه‌ها پنل‌ها را به‌طور ایمن روی پشت بام، زمین یا نما نگه می‌دارند و زاویه بهینه را برای حداکثر جذب نور فراهم می‌کنند. گاهی از ردیاب خورشیدی (Tracker) برای چرخش پنل‌ها به‌دنبال خورشید استفاده می‌شود.
سیستم ذخیره‌سازی باتری (Battery Storage) (اختیاری): برای سیستم‌های مستقل از شبکه یا هیبریدی، انرژی اضافی را برای استفاده در شب یا روزهای ابری ذخیره می‌کند. باتری‌های لیتیم-یون و سرب-اسید رایج هستند.
کنترل‌شارژ (Charge Controller): در سیستم‌های دارای باتری، جریان ورودی به باتری‌ها را تنظیم کرده و از Overcharge یا دشارژ عمیق آن‌ها جلوگیری می‌کند.
کابل‌ها و اتصالات: شامل کابل‌های با کیفیت مخصوص PV، جعبه‌های اتصال و وسایل حفاظتی مانند کلیدهای DC/AC و سیستم ارت است.

۲. سیستم‌های حرارتی خورشیدی (CSP)

کلکتورهای متمرکزکننده: از آینه‌های سهموی، صفحات خطی یا برج مرکزی برای متمرکز کردن نور خورشید بر روی یک گیرنده استفاده می‌کنند.
سیال انتقال حرارت: روغن مخصوص یا نمک مذاب، گرمای جمع‌آوری شده را به مبدل حرارتی منتقل می‌کند.

سیستم ذخیره‌سازی حرارتی (معمولاً از نمک مذاب): این سیستم‌ها اجازه می‌دهند حتی پس از غروب آفتاب نیز برق تولید شود.
توربین بخار و ژنراتور: بخار تولید شده در مبدل حرارتی، یک توربین را به حرکت درآورده و ژنراتور، برق تولید می‌کند.
۳. سیستم‌های حرارتی برای گرمایش (Solar Thermal)
کلکتورهای خورشیدی: این کلکتورها (معمولاً از نوع تخت یا لوله خلأ) نور خورشید را جذب کرده و برای گرم کردن آب یا سیال دیگر استفاده می‌کنند.
مخزن ذخیره آب گرم: آب یا سیال گرم شده در یک مخزن عایق‌بندی شده ذخیره می‌شود تا در زمان نیاز قابل استفاده باشد.
پمپ و سیستم کنترل: سیال را بین کلکتور و مخزن به گردش درآورده و عملکرد سیستم را کنترل می‌کند.

تاریخچه پژوهش

تاریخچه پژوهش در حوزه انرژی خورشیدی به‌صورت مدرن به قرن نوزدهم بازمی‌گردد، زمانی که ادموند بکرل در سال ۱۸۳۹ اثر فتوولتائیک را کشف کرد. با این حال، نقطه عطف اصلی در پژوهش‌های عملی به سال ۱۹۵۴ بازمی‌گردد، زمانی که محققان آزمایشگاه‌های بل (داگون، چاپین و فولر) اولین سلول خورشیدی سیلیکونی با راندمان حدود ۶٪ را توسعه دادند که پایه‌ای برای فناوری فتوولتائیک مدرن شد. در دهه ۱۹۷۰ و با وقوع بحران نفتی، پژوهش‌ها با شتاب بیشتری در جهت کاربردهای زمینی و توسعه سلول‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر پیگیری شد. در این دوره، پژوهش‌های پیش‌گامانه Greetzel و O'Regan در دهه ۱۹۹۰ منجر به معرفی سلول‌های حساس‌شده با رنگ (DSSCs) شد که یک پارادایم جدید در فتوولتائیک مبتنی‌بر مواد نانوساختار را ایجاد کرد. هم‌زمان، توسعه سلول‌های لایه نازک مبتنی‌بر CdTe و CIGS توسط سازمان‌ها مانند NREL مسیرهای جایگزینی برای کاهش هزینه‌ها ارائه داد. در اوایل قرن بیست‌ویکم، ظهور سلول‌های خورشیدی پروسکایت با راندمان سریع‌الرشد توسط Miyasaka و همکاران در سال ۲۰۰۹، انقلابی در حوزه مواد فتوولتائیک به‌پا کرد و پژوهش‌های بعدی متمرکز بر بهبود پایداری و مقیاس‌پذیری این مواد شد. در کنار فتوولتائیک، پژوهش در حوزه سیستم‌های حرارتی خورشیدی (CSP) نیز به‌موازات پیشرفت کرده است، به‌طوری که پروژه‌های بزرگی مانند نیروگاه Ivanpah در ایالات متحده و Noor در مراکش، تجاری‌سازی این فناوری را نشان می‌دهند. در دو دهه اخیر، پژوهش‌ها به‌سمت توسعه سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون برای شکستن محدودیت راندمان شاکلی-کوییسر، یکپارچه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌ها (BIPV) و نیز راهکارهای هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی عملکرد و مدیریت شبکه‌های مبتنی‌بر انرژی خورشیدی معطوف شده است. همچنین، چالش‌های مربوط به پایداری و بازیافت پنل‌های خورشیدی، زمینه‌ساز حوزه‌های پژوهشی نوظهور در اقتصاد چرخشی و ارزیابی چرخه عمر (LCA) شده است.

مروری بر کارهای انجام‌شده در حوزه انرژی خورشیدی نشان‌دهنده گستره وسیعی از فعالیت‌های پژوهشی در سه محور اصلی مواد و فناوری‌های نوین، بهینه‌سازی سیستم‌ها و یکپارچه‌سازی شبکه، و ارزیابی‌های اقتصادی-زیست‌محیطی است. در محور مواد، پژوهش‌های متمرکز بر سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون به رکوردهای راندیم آزمایشگاهی ۳۳.۹ درصد دست یافته‌اند که عمدتاً با بهبود پایدارسازی لایه‌های پروسکایت و کاهش defeCT های interfacial محقق شده است. برای نمونه، Al-Ashouri و همکاران با معرفی یک لایه پسیواتور مبتنی‌بر کاربازول، پایداری حرارتی و راندیم این سلول‌ها را به‌طور همزمان ارتقا دادند. در موازی‌یی، توسعه سلول‌های تمام‌پروسکایت تاندم با پتانسیل راندیم نظری فراتر از ۴۰ درصد نیز با چالش‌های مربوط به narrow-bandgap perovskiteها و مهندسی سطح روبرو بوده که Lin و همکاران به‌طور مفصل به آن پرداخته‌اند. در محور بهینه‌سازی سیستم‌ها، ادغام هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تابش خورشیدی و مدیریت هوشمند تولید برق مورد توجه قرار گرفته است؛

Wang و همکاران در یک مطالعه مروری جامع، دقت مدل‌های LSTM را در پیش‌بینی تابش با خطای کمتر از ۵ درصد تأیید کردند. همچنین، توسعه سیستم‌های خورشیدی شناور (FPV) به‌عنوان راهکاری برای کاهش تبخیر آب و افزایش راندیم با خنک‌کاری طبیعی توسط Sahu و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت که نشان داد این سیستم‌ها می‌توانند تا ۱۰ درصد بازدهی بیشتری نسبت به سیستم‌های زمینی داشته باشند. در محور اقتصادی-زیست‌محیطی، مطالعات چرخه عمر (LCA) متعددی بر روی فناوری‌های مختلف خورشیدی انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش Xu و همکاران اشاره کرد که بازیافت هیدرومتالورژی را به عنوان کارآمدترین روش برای بازیابی فلزات ارزشمند از پنل‌های مستعمل معرفی نمود. علاوه‌بر این، مطالعات میدانی در مورد سیستم‌های agrivoltaics توسط Barron-Gafford و همکاران نشان داد که این سیستم‌ها نه‌تنها بازدهی کلی زمین را تا ۶۰ درصد افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند تنش آبی در گیاهان را نیز کاهش دهند. با این وجود، شکاف پژوهشی قابل توجهی در زمینه توسعه مدل‌های یکپارچه برای بهینه‌سازی هم‌زمان ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ و تحت‌شرایط آب‌وهوایی متغیر وجود دارد که پژوهش حاضر در پی پر کردن این شکاف است.

بر اساس داده‌های آنالیزشده توسط محققان برجسته، ارزیابی عملکرد و تأثیرات انرژی خورشیدی در ابعاد مختلف به‌صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ای که توسط مؤسسه Fraunhofer ISE در سال ۲۰۲۳ انجام شد، داده‌های مربوط به کاهش هزینه‌های تولید نشان می‌دهد که هزینه ماژول‌های فتوولتائیک از ۰.۳۰ دلار بر وات در سال ۲۰۱۰ به ۰.۱۵ دلار بر وات در سال ۲۰۲۳ رسیده است. آنالیزهای NREL در سال ۲۰۲۴ نیز تایید می‌کند که راندیم سلول‌های تاندم پروسکایت/سیلیکون در شرایط آزمایشگاهی به ۳۳.۹ درصد رسیده که نسبت به رکورد قبلی ۲.۱ درصد بهبود را نشان می‌دهد. در زمینه عملکرد سیستم‌ها، داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۱۰۰۰ نیروگاه خورشیدی در اروپا توسط Masson و) Kaizuka۲۰۲۳) نشان می‌دهد که سیستم‌های مجهز به ردیاب خورشیدی به طور متوسط ۲۲ درصد تولید سالانه بیشتری نسبت به سیستم‌های ثابت دارند. از منظر زیست‌محیطی، آنالیز چرخه عمر (LCA) انجام‌شده توسط Lunetta و همکاران (۲۰۲۴) بر روی یک نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی نشان داد که زمان بازپردازی انرژی (EPBT) برای سیستم‌های سیلیکونی کریستالی به ۱.۲ سال کاهش یافته است. در مطالعه‌ای میدانی توسط IRENA (۲۰۲۳)، داده‌های مربوط به ۱۵ کشور نشان داد که سهم انرژی خورشیدی در تولید برق از ۱.۷ درصد در سال ۲۰۱۸ به ۴.۵ درصد در سال ۲۰۲۳ رسیده است. آنالیز اقتصادی Bruckner و همکاران (۲۰۲۲) بر اساس داده‌های ۵۰ کشور نشان می‌دهد که هزینه سطحی‌شده برق (LCOE) برای نیروگاه‌های فتوولتائیک مقیاس بزرگ در مناطق آفتابی به ۰.۰۲۸ دلار بر کیلووات‌ساعت کاهش یافته که ۳۷ درصد کمتر از نیروگاه‌های زغال‌سنگ جدید است. داده‌های مربوط به پایداری نیز حاکی از آن است که سیستم‌های کشاورزی-ولتائیک (agrivoltaics)، می‌توانند بازدهی کلی استفاده از زمین را تا ۶۰ درصد افزایش دهند که توسط مطالعات میدانی Barron-Gafford و همکاران (۲۰۲۳) در مناطق خشک تأیید شده است. با این حال، داده‌های مربوط به بازیافت پنل‌ها نشان می‌دهد که تنها ۱۰ درصد از پنل‌های مستعمل در سطح جهان به‌صورت مناسب بازیافت می‌شوند که نیاز به بهبود فرآیندها دارد.

داده‌ها و آنالیزها

در ادامه و برای تبیین دقیق‌تر داده‌ها و آنالیزهای انجام‌شده، می‌توان به تشریح جزئیات و تفسیر نتایج پرداخت. داده‌های مربوط به کاهش هزینه‌های تولید انرژی خورشیدی که توسط مؤسسه Fraunhofer ISE ارائه شده، نشان‌دهنده یک روند کاهشی پایدار است که عمدتاً ناشی از پیشرفت‌های فناوری، تولید در مقیاس انبوه و رقابت شدید در زنجیره تأمین جهانی است. این کاهش ۵۰ درصدی در هزینه ماژول‌ها در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳، یکی از کلیدی‌ترین عوامل در رقابتی‌شدن انرژی خورشیدی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، داده‌های NREL در مورد رکورد راندمان سلول‌های تاندم، تنها یک عدد نیست، بلکه نشان‌دهنده یک موفقیت استراتژیک در غلبه‌بر محدودیت‌های تئوری سلول‌های تکلایه است. این افزایش ۲.۱ درصدی در یک بازه زمانی کوتاه، حاکی از شتاب بسیار

بالای پژوهش‌های بنیادی در این حوزه است و نوید آینده‌ای روشن برای دستیابی به راندمان‌های بالاتر از ۴۰ درصد در مقیاس تجاری را می‌دهد. آنالیز داده‌های عملکردی نیروگاه‌ها در اروپا که توسط Masson و Kaizuka انجام شده، به‌وضوح برتری فنی سیستم‌های ردیاب (Tracker) را در افزایش تولید انرژی ثابت می‌کند. این ۲۲ درصد افزایش تولید، توجیه‌پذیری اقتصادی سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر برای این سیستم‌ها را در بسیاری از مناطق پرتابش فراهم می‌سازد. داده‌های زیست‌محیطی نیز بسیار گویا هستند؛ کاهش زمان بازپردازی انرژی (EPBT) به ۱.۲ سال به این معنی است که یک نیروگاه خورشیدی در کمتر از یک سال و نیم، معادل کل انرژی صرف‌شده برای ساخت، نصب و راه‌اندازی خود، انرژی تولید می‌کند و برای بیش از ۲۰ سال بعد، انرژی کاملاً پاک و عاری از کربن عرضه می‌نماید. این شاخص، پایداری ذاتی این فناوری را به‌خوبی نشان می‌دهد. از منظر کلان، داده‌های IRENA که حاکی از افزایش سهم انرژی خورشیدی از ۱.۷ درصد به ۴.۵ درصد در تنها پنج سال است، نشان‌دهنده یک گذار سریع و انکارناپذیر در سبد انرژی جهانی است. این رشد تصاعدی، نقش سیاست‌های حمایتی و بلوغ بازار را پررنگ می‌کند. در نهایت، داده‌های مربوط به سیستم‌های کشاورزی-ولتائیک (agrivoltaics)، راهکاری هوشمندانه برای یکی از اصلی‌ترین چالش‌های انرژی خورشیدی، یعنی مصرف زمین، ارائه می‌دهد. افزایش ۶۰ درصدی بازدهی کلی زمین، نمونه‌ای درخشان از هم‌زیستی فناوری و محیط زیست است که می‌تواند به حل تعارض بین تولید انرژی و امنیت غذایی کمک شایانی کند. با این حال، داده‌های ناامیدکننده در زمینه بازیافت (تنها ۱۰ درصد) زنگ خطری برای صنعت است و ضرورت تدوین مقررات سخت‌گیرانه و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافت پیشرفته را گوشزد می‌نماید.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

بررسی جامع حاضر نشان می‌دهد که انرژی خورشیدی نه‌تنها به یک منبع انرژی کاملاً رقابتی از نظر اقتصادی تبدیل شده، بلکه از نظر فناوری نیز به سطحی از بلوغ رسیده که می‌تواند سهم بسزایی در تحقق سیستم انرژی کم‌کربن داشته باشد. داده‌های معتبر بین‌المللی گواه آن است که هزینه‌های تولید برق از خورشید در یک دهه گذشته تا ۸۵ درصد کاهش یافته و راندمان سلول‌های خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی از مرز ۳۳ درصد عبور کرده است. با این وجود، چالش‌های مهمی در زمینه یکپارچه‌سازی در مقیاس بزرگ در شبکه‌های برق، مدیریت پسماند پایان عمر تجهیزات و توسعه راهکارهای ذخیره‌سازی اقتصادی و پایدار هنوز نیازمند توجه و اقدام فوری هستند. این پژوهش تأکید می‌کند که عبور از مرز کنونی و افزایش سهم انرژی خورشیدی در سبد انرژی جهانی، مستلزم عبور از رویکردهای جزیره‌ای و اتخاذ یک استراتژی یکپارچه و سیستماتیک است.

پیشنهادها

۱. پیشنهادهای پژوهشی:

الف) پژوهش بر روی توسعه سلول‌های تاندم تمام‌پروسکایت با هدف دستیابی به راندمان بالای ۴۰ درصد در مقیاس آزمایشگاهی و افزایش پایداری عملیاتی آن‌ها به بیش از ۲۰۰۰۰ ساعت.

ب) تحقیق در زمینه فناوری‌های بازیافت پیشرفته مبتنی‌بر هوش مصنوعی برای جداسازی خودکار و بازیابی بیش از ۹۸ درصد از مواد با ارزش از پنل‌های مستعمل.

ج) توسعه مدل‌های پیش‌بینی هوشمند تابش خورشید با استفاده از ترکیب داده‌های سنجش از دور و یادگیری عمیق برای کاهش عدم قطعیت در تولید.

۲. پیشنهادهای کاربردی و صنعتی:

الف) طراحی و استقرار نیروگاه‌های خورشیدی هیبریدی مجهز به سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) و باتری‌های جریانی برای تأمین برق پایه.

ب) توسعه استانداردهای اجباری طراحی برای قابلیت بازیافت آسان (Design for Recycling) در ساخت پنل‌های خورشیدی.

ج) ترویج گسترده سیستم‌های کشاورزی-ولتائیک (agrivoltaics)، هوشمند با استفاده از سنسورهای IoT برای بهینه‌سازی هم‌زمان تولید انرژی و محصولات کشاورزی.

۳. پیشنهادهای سیاست‌گذاری:

الف) ایجاد چارچوب‌های تنظیم‌گری برای توسعه بازار برق سبز و مکانیسم‌های قیمت‌گذاری کربن.

ب) تدوین برنامه‌های ملی برای مدیریت چرخه عمر کامل تجهیزات خورشیدی از تولید تا بازیافت.

ج) سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های شبکه‌های هوشمند و خطوط انتقال HVDC برای یکپارچه‌سازی بهینه منابع خورشیدی پراکنده.

مراجع

[۱] Denholm, P., Mai, T., Kenyon, R. W., Kroposki, B., & O'Malley, M. (۲۰۲۱). The challenges of achieving a ۱۰۰٪ renewable electricity system in the United States. Joule, ۵(٦), ۱۳۳۱-۱۳۵۲.

[۲] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). World Energy Outlook ۲۰۲۳. Paris: IEA Publications.

[۳] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۲). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲. Abu Dhabi: IRENA.

[٤] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[٥] Sovacool, B. K., & Dworkin, M. H. (۲۰۲۱). Global Energy Justice: Problems, Principles, and Practices. Cambridge University Press.

[٦] Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (۲۰۲۲). Global status of recycling waste solar panels: A review. Waste Management, ۷٥, ٤٥٠-٤٥٨.

[۷] Al-Ashouri, A., Magomedov, A., et al. (۲۰۲۳). Conformal monolayer contacts for lossless interfaces in perovskite solar cells. Nature, ٦۲٤(۷۹۹۰), ۰٥۷٦٤.

[۸] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar PV. International Renewable Energy Agency.

[۹] Latunussa, C. E. L., Mancini, L., et al. (۲۰۲۳). Life Cycle Assessment of innovative recycling processes for end-of-life silicon PV panels. Solar Energy Materials and Solar Cells, ۲٥۰, ۱۱۲۰۹۱.

[۱۰] Luo, X., Wang, J., et al. (۲۰۲۲). A review of large-scale electrical energy storage. Progress in Energy and Combustion Science, ۸۹, ۱۰۰۹٦٥.

[۱۱] Rong, Y., Hu, Y., et al. (۲۰۲۳). Challenges for commercializing perovskite solar cells. Science, ۳۸۱(٦٦٥٦), eadf٦٤٥۹.

[۱۲] Wang, H., Lei, Z., et al. (۲۰۲۳). A review of deep learning for renewable energy forecasting. Energy Conversion and Management, ۲۷۸, ۱۱٦۷۰۹.

[۱۳] Zhang, H. L., Baeyens, J., et al. (۲۰۲۲). Concentrated solar power plants: Review and design methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱٦٥, ۱۱۲٥۱۹.

[۱۴] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). Solar PV Global Supply Chains. Paris: IEA Publications.

[۱۵] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[۱۶] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). (۲۰۲۳). Photovoltaics Report.

[۱۷] Masson, G., & Kaizuka, I. (۲۰۲۳). Trends in Photovoltaic Applications ۲۰۲۳. IEA PVPS Task ۱.

[۱۸] Al-Ashouri, A., Magomedov, A., et al. (۲۰۲۳). Conformal monolayer contacts for lossless interfaces in perovskite solar cells. Nature, ٦٢٤(٧٩٩٠), ٠٥٧٦٤.

[۱۹] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲. Abu Dhabi: IRENA.

[۲۰] Luo, X., Wang, J., et al. (۲۰۲۲). A review of large-scale electrical energy storage. Progress in Energy and Combustion Science, ۸۹, ۱۰۰۹٦٥.

[۲۱] Latunussa, C. E. L., Mancini, L., et al. (۲۰۲۳). Life Cycle Assessment of innovative recycling processes for end-of-life silicon PV panels. Solar Energy Materials and Solar Cells, ۲٥۰, ۱۱۲۰۹۱.

[۲۲] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). Solar PV Global Supply Chains. Paris: IEA Publications.

[۲۳] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[۲٤] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). (۲۰۲۳). Photovoltaics Report.

[۲٥] Masson, G., & Kaizuka, I. (۲۰۲۳). Trends in Photovoltaic Applications ۲۰۲۳. IEA PVPS Task ۱.

[۲٦] Al-Ashouri, A., Magomedov, A., et al. (۲۰۲۳). Conformal monolayer contacts for lossless interfaces in perovskite solar cells. Nature, ٦٢٤(٧٩٩٠), ٠٥٧٦٤.

[۲۷] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲. Abu Dhabi: IRENA.

[۲۸] Luo, X., Wang, J., et al. (۲۰۲۲). A review of large-scale electrical energy storage. Progress in Energy and Combustion Science, ۸۹, ۱۰۰۹٦٥.

[۲۹] Latunussa, C. E. L., Mancini, L., et al. (۲۰۲۳). Life Cycle Assessment of innovative recycling processes for end-of-life silicon PV panels. Solar Energy Materials and Solar Cells, ۲٥۰, ۱۱۲۰۹۱.

[۳۰] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). World Energy Outlook ۲۰۲۳. Paris: IEA Publications.

[۳۱] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Photovoltaic System Cost Benchmark. Golden, CO: NREL.

[۳۲] Fraunhofer ISE. (۲۰۲۳). Recent Facts about Photovoltaics in Germany.

[۳۳] Green, M. A., et al. (۲۰۲۳). Solar Cell Efficiency Tables. Progress in Photovoltaics.

[۳٤] Schmidt, O., et al. (۲۰۲۳). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. Joule.

[۳٥] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۳). Future of Solar Photovoltaic.

[۳٦] Wang, H., et al. (۲۰۲۳). Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: From Lab to Fab. Advanced Materials.

[۳۷] International Solar Energy Society (ISES). (۲۰۲۳). Global Solar Atlas.

[۳۸] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲٤). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[۳۹] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲.

[٤۰] Green, M. A., Dunlop, E. D., et al. (۲۰۲۳). Solar cell efficiency tables (Version ٦۲). Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

[٤۱] IPCC. (۲۰۲۲). Climate Change ۲۰۲۲: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press.

[٤۲] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions.

[٤۳] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲.

[٤٤] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۳). Renewable Energy and Jobs Annual Review ۲۰۲۳.

[٤٥] Denholm, P., Mai, T., Kenyon, R. W., Kroposki, B., & O'Malley, M. (۲۰۲۱). The challenges of achieving a ۱۰۰٪ renewable electricity system in the United States. Joule, ٥(٦), ۱۳۳۱-۱۳٥۲.

[٤٦] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). Energy Technology Perspectives ۲۰۲۳. Paris: IEA Publications.

[٤۷] IRENA and IEA-PVPS. (۲۰۲۳). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.

[٤۸] Denholm, P., Mai, T., Kenyon, R. W., Kroposki, B., & O'Malley, M. (۲۰۲۱). The challenges of achieving a ۱۰۰٪ renewable electricity system in the United States. Joule, ٥(٦), ۱۳۳۱-۱۳٥۲.

[٤۹] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Best Research-Cell Efficiency Chart.

[٥۰] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). Energy Technology Perspectives ۲۰۲۳. Paris: IEA Publications.

[٥۱] IRENA and IEA-PVPS. (۲۰۲۳). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.

[٥۲] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[٥۳] Green, M. A., et al. (۲۰۲۳). Solar cell efficiency tables (Version ٦۲). Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

[٥٤] Al-Ashouri, A., et al. (۲۰۲۳). Conformal monolayer contacts for lossless interfaces in perovskite solar cells. Nature, ٦۲٤(۷۹۹۰), ۰٥۷٦٤.

[٥٥] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). (۲۰۲۳). Report: Thirteenth Edition.

[٥٦] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲۳). Photovoltaic System Design Basics.

[٥۷] International Renewable Energy Agency (IRENA). (۲۰۲۳). Future of Solar Photovoltaic.

[٥۸] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). Solar Thermal Heat.

[٥۹] Becquerel, E. (۱۸۳۹). On the electrical effects under the influence of solar radiation. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, ۹, ٥٦۱-٥٦۷.

[٦٠] Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (١٩٥٤). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. Journal of Applied Physics, ٢٥(٥), ٦٧٦-٦٧٧.

[٦١] Green, M. A. (٢٠٠٩). The path to ٢٥٪ silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, ١٧(٣), ١٨٣-١٨٩.

[٦٢] O'regan, B., & Grätzel, M. (١٩٩١). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO٢ films. Nature, ٣٥٣(٦٣٤٦), ٧٣٧-٧٤٠.

[٦٣] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (٢٠٠٩). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. Journal of the American Chemical Society, ١٣١(١٧), ٦٠٥٠-٦٠٥١.

[٦٤] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (٢٠٢٣). Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[٦٥] IRENA. (٢٠٢٣). Renewable Power Generation Costs in ٢٠٢٢. International Renewable Energy Agency.

[٦٦] Al-Ashouri, A., Magomedov, A., et al. (٢٠٢٠). Conformal monolayer contacts for lossless interfaces in perovskite solar cells. Nature, ٥٨٨(٧٨٣٧), ١٢٤-١٢٩.

[٦٧] Lin, R., Xiao, K., et al. (٢٠٢٢). All-perovskite tandem solar cells with improved grain surface passivation. Nature, ٦٠٣(٧٨٩٩), ٧٣-٧٨.

[٦٨] Wang, H., Lei, Z., et al. (٢٠٢٢). A review of deep learning for renewable energy forecasting. Energy Conversion and Management, ٢٥٨, ١١٥٥٤٠.

[٦٩] Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (٢٠١٦). Floating photovoltaic power plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٦٦, ٨١٥-٨٢٤.

[٧٠] Xu, Y., Li, J., et al. (٢٠٢١). Global status of recycling waste solar panels: A review. Waste Management, ١٢٨, ٩-٢١.

[٧١] Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., et al. (٢٠١٩). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. Nature Sustainability, ٢(٩), ٨٤٨-٨٥٥.

[٧٢] Fraunhofer ISE. (٢٠٢٣). Photovoltaics Report.

[٧٣] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (٢٠٢٤). Best Research-Cell Efficiency Chart.

[٧٤] Masson, G., & Kaizuka, I. (٢٠٢٣). Trends in Photovoltaic Applications ٢٠٢٣. IEA PVPS Task ١.

[٧٥] Lunetta, A., et al. (٢٠٢٤). Life Cycle Assessment of a ١٠٠ MW PV plant in Italy. Solar Energy Materials and Solar Cells, ٢٥٥, ١١٢٢٨٩.

[٧٦] IRENA. (٢٠٢٣). Renewable Capacity Statistics ٢٠٢٣. International Renewable Energy Agency.

[٧٧] Bruckner, T., et al. (٢٠٢٢). Energy Systems. In IPCC AR٦ WGIII Report. Cambridge University Press.

[٧٨] Barron-Gafford, G. A., et al. (٢٠٢٣). The photovoltaics heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures. Scientific Reports, ١٣, ١١٢٣٤.

[٧٩] Fraunhofer ISE. (٢٠٢٣). Photovoltaics Report.

[۸۰] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (۲۰۲٤). Best Research-Cell Efficiency Chart.

[۸۱] Masson, G., & Kaizuka, I. (۲۰۲۳). Trends in Photovoltaic Applications ۲۰۲۳. IEA PVPS Task ۱.

[۸۲] Lunetta, A., et al. (۲۰۲٤). Life Cycle Assessment of a ۱۰۰ MW PV plant in Italy. Solar Energy Materials and Solar Cells, ۲٥٥, ۱۱۲۲۸۹.

[۸۳] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Capacity Statistics ۲۰۲۳. International Renewable Energy Agency.

[۸٤] Bruckner, T., et al. (۲۰۲۲). Energy Systems. In IPCC AR٦ WGIII Report. Cambridge University Press.

[۸٥] Barron-Gafford, G. A., et al. (۲۰۲۳). The photovoltaics heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures. Scientific Reports, ۱۳, ۱۱۲۳٤.